



"Ceci n'est pas une brouette". Grands et petits récits des nanotechnologies

Sacha Loeve

► To cite this version:

Sacha Loeve. "Ceci n'est pas une brouette". Grands et petits récits des nanotechnologies. La Découverte. Humains, non humains. Comment repeupler les sciences sociales, La Découverte, pp.208-220, 2011, " Sciences Humaines ". hal-00706508

HAL Id: hal-00706508

<https://hal.science/hal-00706508>

Submitted on 10 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

« Ceci n'est pas une brouette »

Grands et petits récits des nanotechnologies*

Sacha Loeve**

Le grand récit des nanotechnologies, ressassé *ad nauseam* dans les rapports officiels, les documents programmatiques, les feuilles de route et la presse scientifique, raconte comment l'humain conquiert une « nouvelle frontière » – le nanomonde – pour étendre son empire en domestiquant ses habitants, colonisant ses territoires et contrôlant ses non-humains. L'accès à l'échelle moléculaire permettrait en effet aux humains de faire sauter les verrous que le monde matériel leur oppose encore : au lieu de tailler grossièrement outils et pièces de machines dans la matière pour venir ensuite buter contre les limites physiques du matériau, nous irions recombinaison à volonté les « briques élémentaires de construction » (atomes et molécules) de tout ce qui existe pour nous refaire un monde où la matière nous obéirait au doigt et l'oeil. En passant du « *top-down* » au « *bottum-up* », nous deviendrons capables de « façonner le monde atome par atome »¹.

Seulement voilà, le « nanomonde » n'est accessible ni au doigt, ni à l'oeil : pour nous en rendre « comme maîtres et possesseurs », il nous faut « machiner » la matière dans ses moindres parties, constituer ses composants élémentaires en dispositifs adressables, réceptifs et actionnables, ou encore synthétiser des molécules qui soient *directement* des machines : des molécules-machines.

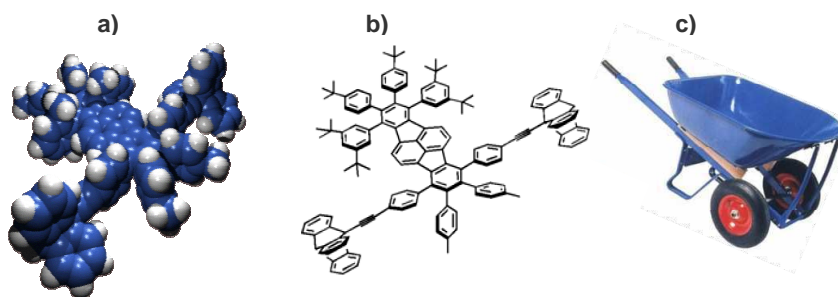


Figure 1. $C_{140}H_{120}$, brouette moléculaire.

a) modélisation moléculaire ;
b) formule topologique ;
c) analogue macroscopique.
Source : CEMES.

Allons y voir de plus près, et suivons les transformations de quelques nanomachines réalisées en laboratoire : une brouette (figure 1), un moteur (figure 11). Que devient, dans ces pratiques, le grand récit « *hype* » qu'elles sont censées mettre en œuvre ? Loin de se matérialiser en froides réalités objectives qui viendraient soit l'alimenter, soit lui opposer la sobriété des faits, le grand récit cède la place à des « petits récits techniques » d'humains et de non-humains. Il n'y a donc pas d'un côté, des grands discours hors-sol,

* Une précédente version de cet article a été publiée dans *Humains non humains. Comment repeupler les sciences sociales*, Sophie HOUDART et Olivier THIERRY (éds.), Paris, La découverte, 2011, pp. 208-220.

(http://www.editions-ladecouverte.fr/catalogue/index-Humains_non_humains-9782707165190.html)

** Post-doctorant au Centre d'Etude des Techniques, des CONnaissances et des PRATiques, CETCOPRA, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (sacha.loeve@univ-paris1.fr).

¹ <http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Public.Brochure/>

et de l'autre, la réalité concrète des pratiques, mais des grands et des petits récits : des pratiques discursives constituant et traitant différemment leurs objets et des objets qui « attrapent » les discours de différentes manières. En effet, lorsque nous tentons de faire fonctionner ces objets situés en deçà du visible et hors de portée de la main, toute *perception* et toute *action*, forcément instrumentées, constituent une bribe de *narration*. Nous avons choisi de faire ici écho aux « petits récits techniques » que nous confient les chercheurs. Nous montrons notamment que ceux-ci obligent à repenser le sens des concepts technologiques de base, faussement univoques et tout-terrain, que les grands discours des nanos utilisent à foison, tels que « contrôle », « fonction » et « application ».

Où une brouette naquit d'une girouette

Les nanomachines du GNS² sont nées sous la pointe d'un microscope à effet tunnel (STM pour *Scanning Tunneling Microscope*). Contrairement à ce que l'on entend dire souvent, le STM ne « voit » pas les atomes ; il ne « voit » rien. En approchant une pointe à quelques nanomètres de la surface d'un matériau électrisé pour « sentir » le courant tunnel³ qui se forme à sa surface il procède comme un aveugle qui lit le braille, donne des coups de sonde avec sa canne ou déchiffre le relief d'un visage en l'effleurant. C'est donc en se « branchant » sur ce courant tunnel, par lequel il forme un circuit électrique avec l'échantillon, et en balayant sa pointe latéralement à la surface de l'échantillon, que le STM détermine la morphologie et la densité électronique de surfaces conductrices ou semi-conductrices avec une résolution spatiale égale ou inférieure à la taille des atomes. Les images de ces surfaces, et dans certaines conditions, de ce qui y est déposé, sont ensuite générées par « collage numérique » de ces relevés électriques ou topographiques pris ligne par ligne. Le STM peut aussi connecter sa pointe à un atome ou une molécule adsorbée sur la surface et interagir avec cet objet : le pousser, le tirer, le manipuler dans un piège électrostatique, le chatouiller, l'impulser, enregistrer sa réponse.

IBM Zürich, fin des années 1990 : deux physiciens, Christian Joachim et James Gimzewski, s'amuse à imager des « molécules à pattes » qui n'avaient jamais été « adressées » au STM. Ils cherchent à déterminer, pour le pur plaisir de la « zoologie »⁴, quel peut être le « faciès » de ces molécules, notamment si l'image STM va dessiner leurs pattes ou leurs corps...⁵

Les voici donc en train de scanner un dépôt en monocouche de quelques millions de molécules appelées hexa-tert-butyl-decacylcene. Comme leur nom l'indique, ces molécules de quelques 1,5 nm de diamètre ont six pieds terminées par trois chaînes carbone saturées reliant un plateau de dix cycles aromatiques butyl (figure 2a). Sur l'image STM, leur organisation supramoléculaire est bien visible : les molécules sont encastées les unes dans les autres. Cependant, cette organisation supramoléculaire

² Le Groupe NanoSciences coordonné par Christian Joachim au Centre d'Elaboration des Matériaux et d'Etudes Structurales (CEMES-CNRS, Toulouse). Nous remercions ici les chercheurs que nous avons interviewés au CEMES dans le cadre du projet ANR blanc « Bio-nano-éthique » (2008-2008).

³ Les électrons circulant dans un matériau électrisé ont une probabilité non nulle de se trouver là où leur énergie cinétique ne leur permet pas d'aller. Les physiciens disent qu'ils « traversent une barrière de potentiel » comme s'ils passaient dans un tunnel ; ce faisant, ils forment une sorte de brume électronique à la surface du matériau.

⁴ Christian JOACHIM, entretien au CEMES, 16 novembre 2006.

⁵ La présence de « pattes » permet d'isoler le corps de la molécule de la surface conductrice sur laquelle elle est adressée. Sans leur présence, le STM serait incapable de distinguer suffisamment les molécules de la surface, car leurs états électroniques se mélangeraient. L'autre solution pour imager des molécules organiques au STM est de recouvrir les surfaces métalliques d'une couche isolante.

n'est pas absolument cristalline ; de petits décalages existent. Ainsi, durant un scan, l'une de ces molécules, légèrement désencastrée de ses voisines, capte leur attention, comme si elle leur adressait un clin d'œil : son image est moins nette que ses congénères (figure 2b, c). Ils placent alors la pointe du STM au centre de la molécule, la poussent pour l'enchâsser entre ses voisines (figure 2d), puis scannent à nouveau : l'image redevient claire, avec les six pattes bien distinctes. Conclusion : la molécule tournait comme une girouette sous l'effet de l'agitation thermique. C'était la première fois que l'on obtenait une image de la rotation d'une molécule, ce qui suffit pour faire les gros titres de *Science* (figure 2e)⁶.

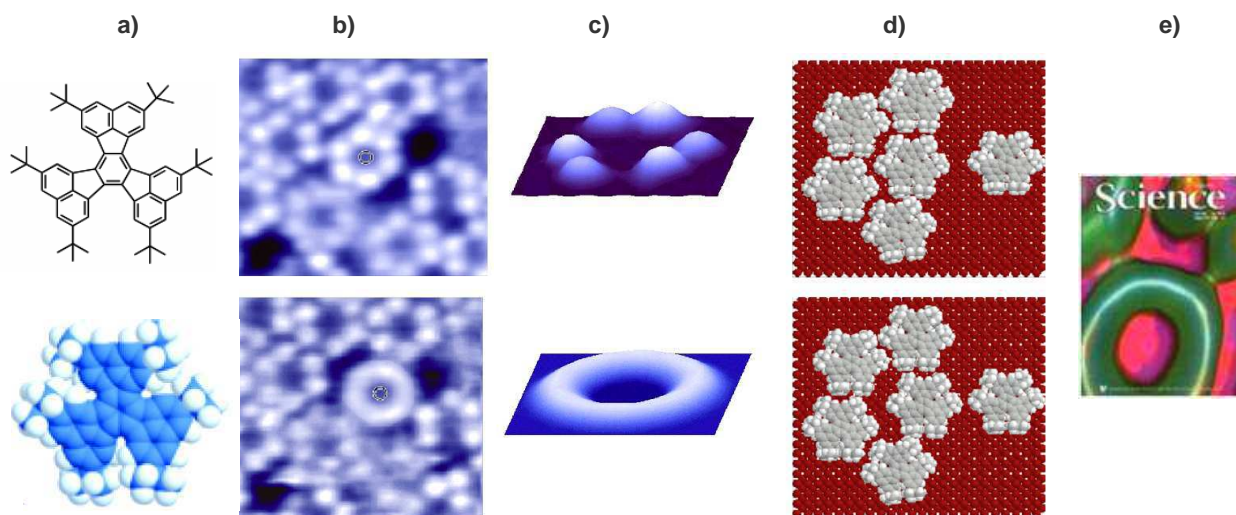


Figure 2. Girouette moléculaire. a) formule topologique (en haut) et modélisation moléculaire (en bas) de hexa-tert-butyl-decacycene, molécule à six pattes ; b) image STM, nette en haut (on distingue bien les six pattes), floue en bas ; c) image calculée par le logiciel ESQC ; d) modélisation de mécanique moléculaire ; e) couverture de *Science*. Source : CEMES.

C'est de ce phénomène et des potentialités qu'il suggérait qu'est né le programme de « mécanique moléculaire » du GNS. Celui-ci comportait initialement deux objectifs :

- 1) *Contrôler* le mouvement de rotation d'une molécule autour d'un axe, le rendre directionnel, ou autrement dit : réinventer la roue. Le mouvement brownien étant équiprobable dans toutes les directions, hexa-tert-butyl-decacycene ne faisait que tourner en tous sens. C'était précisément une girouette, et non une roue. Or, quel est le système le plus simple permettant de contrôler une rotation ? C'est un système qui, lorsqu'on le pousse, transforme un mouvement de translation en un mouvement de rotation : une roue, un axe, un plateau. Dans notre monde, cet objet est... une brouette.
- 2) Obtenir un *travail* : mettre au point une chaîne opératoire couplant les mouvements de rotation les uns aux autres manière à ce qu'ils puissent convertir un apport d'énergie en travail. En d'autres termes : réinventer le moteur.

Pour coordonner la synthèse de la brouette, le GNS engage un chimiste talentueux, Gwénaél Rapenne. Ce sont les physiciens qui dessinent un premier « design » de brouette moléculaire en décalquant le plus possible l'archétype de la brouette telle que

⁶ James K. GIMZEWSKI, Christian JOACHIM, Reto R. SCHLITTLER, Véronique LANGLAIS, Hao TANG, Ib JOHANNSEN, « Rotation of a Single Molecule Within a Supramolecular Bearing », *Science*, vol. 281, n° 5376, 1998, p. 531-533.

nous la connaissons dans notre monde, avec deux poignées et une unique roue centrale (figure 3a). Mais avant de se mettre à l'ouvrage, G. Rapenne fait comprendre à ses intrépides collègues physiciens que certaines molécules, pour être physiquement possibles, n'en demeurent pas moins chimiquement inaccessibles. En effet, en mélangeant des produits, on ne peut ni ouvrir le châssis pour y incorporer le fragment incarnant la roue, ni assembler le châssis autour de la roue. Il faut revoir le design.

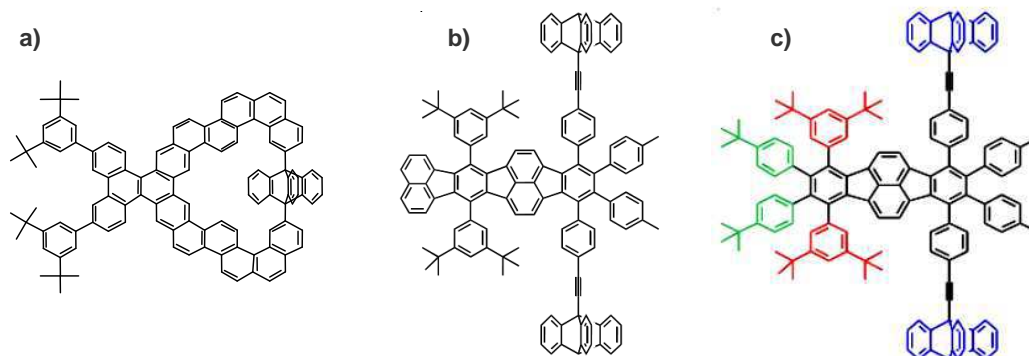


Figure 3. Designs de brouette. a) premier design (chimiquement irréalisable) ; b) second design (réalisable mais peu propice à la manipulation par STM) ; c) design finalement choisi. La brouette finale possède : un châssis (en noir) ; deux roues indépendantes (en bleu) ; deux pieds (en rouge) isolant le châssis de la surface; des poignées (en vert) permettant de la manipuler avec la pointe du STM.

Une nouvelle brouette est donc dessinée avec deux roues latérales (figure 3b), cette fois en concertation avec les chimistes. Une première voie de synthèse est envisagée avec un bon rendement global (2 %), mais c'est une seconde voie, plus difficile, avec un plus grand nombre d'étapes et un rendement moindre, qui est choisie, car elle permet d'obtenir une brouette aux « poignées » plus larges que la première, plus à même d'accueillir la pointe du STM qui poussera la molécule sur la surface (figure 3c).

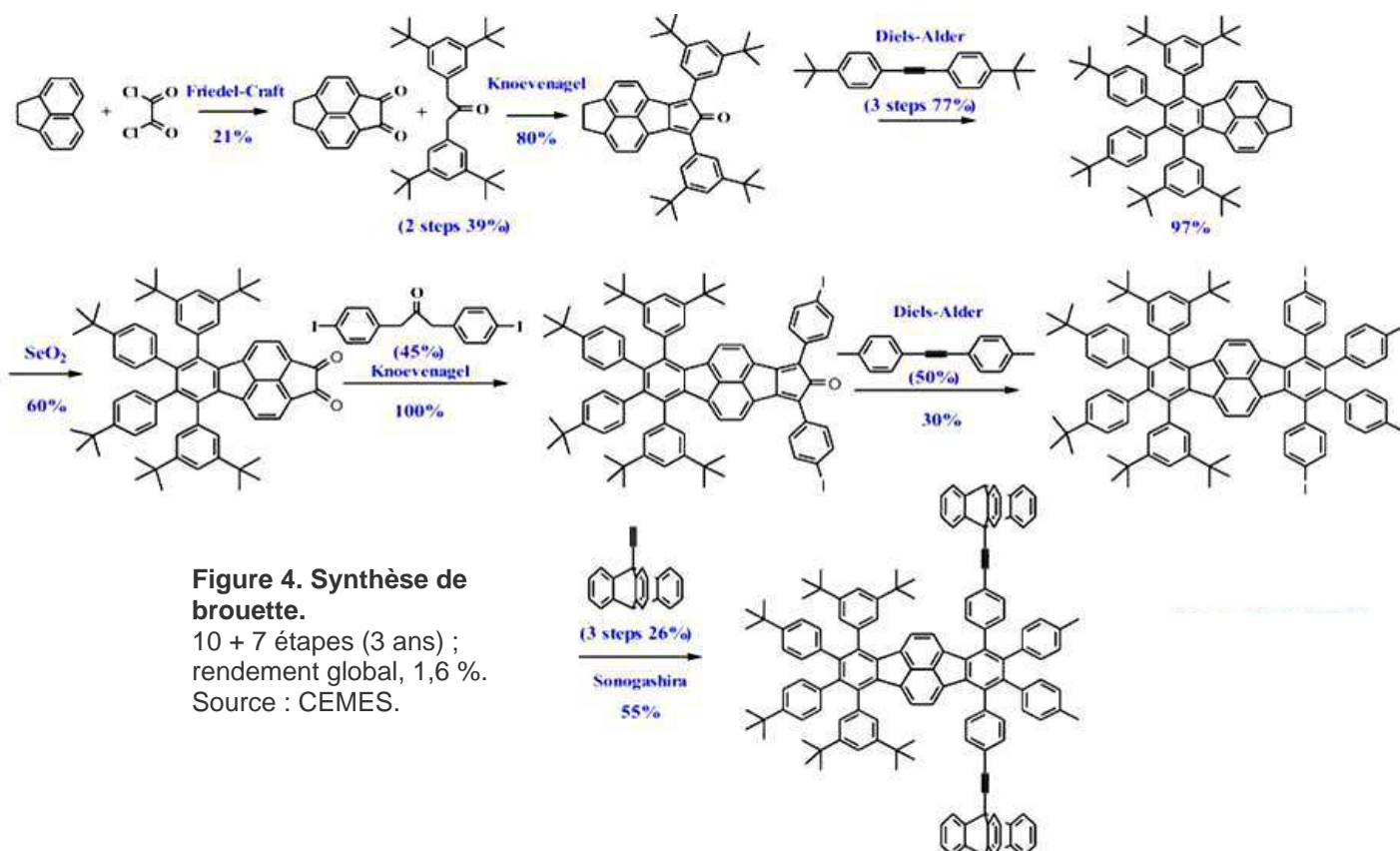


Figure 4. Synthèse de brouette.
10 + 7 étapes (3 ans) ;
rendement global, 1,6 %.
Source : CEMES.

La synthèse de la brouette moléculaire⁷ (figure 4) prend trois ans, au bout desquels 1,6% du total des produits utilisés, soit quelques milligrammes de poudre de brouette, sont obtenus.

Pour les brouettes, le grand jour est enfin arrivé : elles sont prêtes pour le dépôt dans l'enceinte sous vide du STM – une opération qui, pour l'équipe, a une importance aussi grande que le lancement d'un satellite par la NASA. Les physiciens expérimentateurs subliment le produit obtenu dans une cellule de Knudsen : ils font passer quelques milligrammes d'une poudre de brouettes de l'état solide à l'état gazeux dans un creuset porté en peu de temps à haute température. Les molécules sont crachées par l'orifice de la cellule et impactent la surface de cuivre de l'échantillon placé sous vide dans l'enceinte du STM. Les expérimentateurs approchent la pointe du STM, lancent un premier scan, règlent filtres et amplificateurs jusqu'à obtenir un signal cohérent, réitèrent jusqu'à l'obtention du signal le plus fin possible (l'opération peut durer des heures). Ils regardent sur l'écran d'ordinateur la surface se dessiner ligne par ligne. Les molécules déposées apparaissent comme des points brillants aux formes floues.

Où des Objets Moléculaires Non Identifiés firent bifurquer le projet

Reconnaître une molécule sur une image STM n'est pas chose facile ni immédiate. Les chercheurs s'aident d'un logiciel forgé par les théoriciens du GNS, *Elastic Scattering Quantum Chemistry* (ESQC). ESQC opérationnalise des théories. À partir de la formule développée d'une molécule connue, le logiciel calcule l'image expérimentale à laquelle les chercheurs peuvent s'attendre en fonction de l'intensité du courant de consigne choisi pour l'imagerie, les coordonnées des mailles du cristal sur lequel la molécule atterrit et d'autres données comme le potentiel d'interaction de la surface. Il permet d'anticiper l'image expérimentale pour permettre sa reconnaissance, ou identifier ce qui cloche. Au GNS, reconnaître une molécule, c'est s'accorder à plusieurs sur la ressemblance de l'image expérimentale avec l'image anticipée par calcul ESQC après avoir passé en revue les causes potentielles de tromperie : un creux pris pour une bosse, une différence locale d'intensité prise pour une différence de hauteur, un effet de moiré. Il y a toujours une marge d'appréciation.

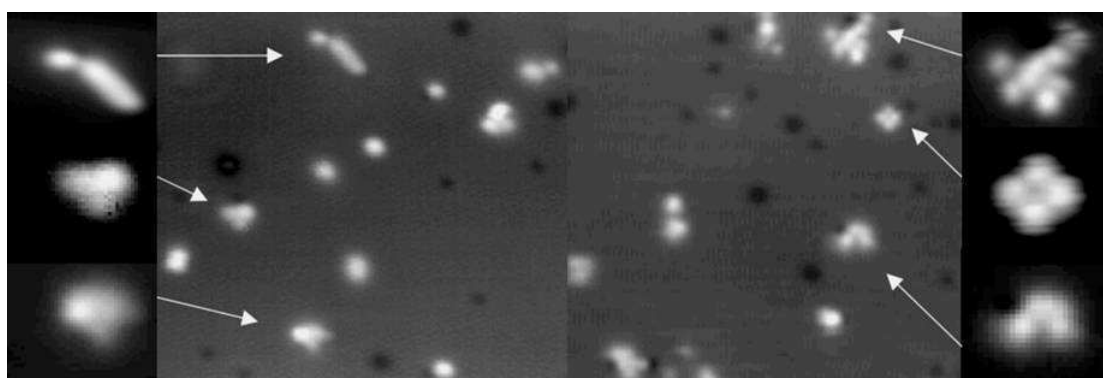


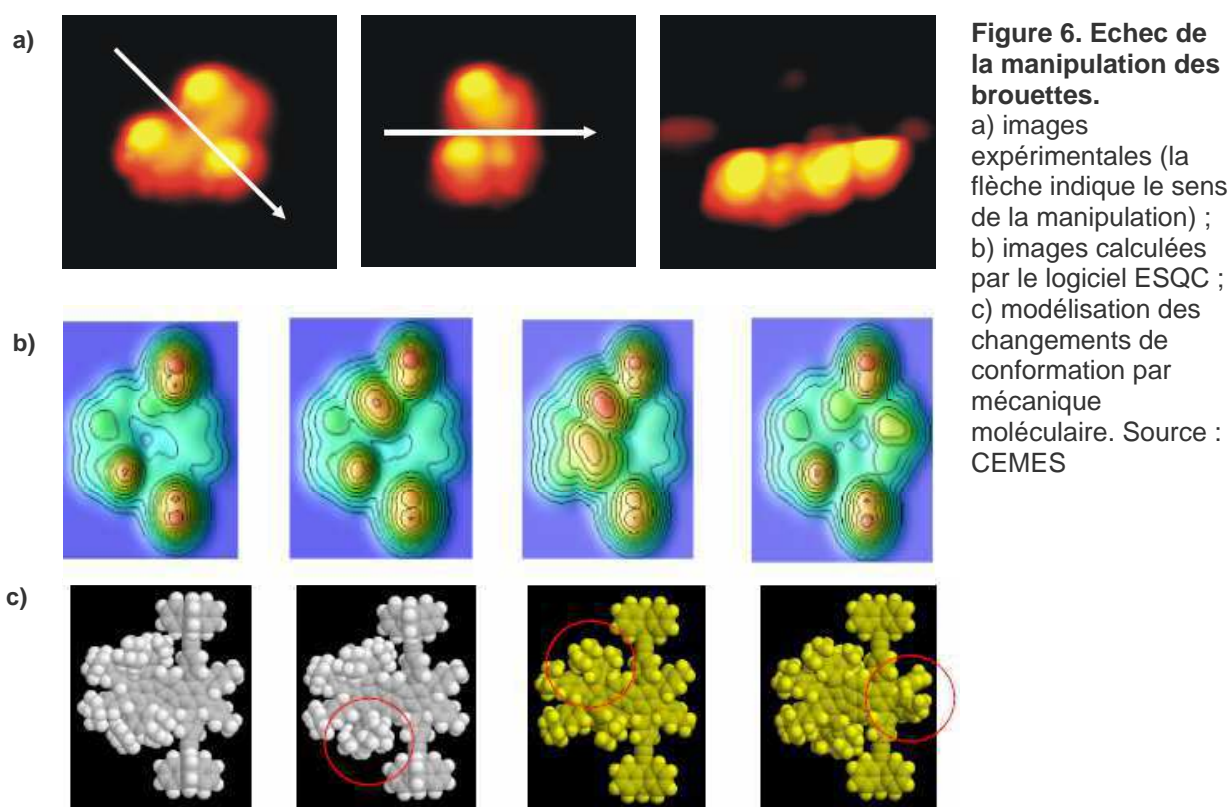
Figure 5. Objets Moléculaires Non Identifiés. Source : CEMES.

À leur grande surprise, c'est « un véritable zoo » d'ectoplasmes de formes diverses qu'ils découvrent : des bâtonnets, des hélices, des anneaux et même des champignons (figure

⁷ Gwénaél RAPENNE, Gorka JIMENEZ-BUENO, « Technomimetic Molecules: Synthesis of a Molecular Wheelbarrow », *Tetrahedron Letters*, vol. 44, issue 33, 2003, pp. 6261-6263.

5). Impossible de dire, par simple observation, à quelles molécules ces adsorbats correspondent. Et les brouettes ? Introuvables.

Les brouettes ont probablement été disloquées pendant la procédure de dépôt. L'opération est donc réitérée avec une méthode de « lancement » plus douce : les molécules se détachent gentiment d'un filament progressivement électrisé. Les brouettes sont bien identifiées par recoupement avec les images anticipées par ESQC. Il est temps de manipuler. Il faut déjà s'assurer que la molécule se déplace avec la pointe. Ensuite, on cherchera à caractériser le mouvement pour voir si il y a ou non rotation des roues. Mais en réponse à la force exercée par la pointe, la molécule-brouette change de conformation, mais ne se déplace pas (figure 6). La molécule est trop molle. On ne fait que la chatouiller.



L'équipe décide de se pencher à nouveau sur les objets non identifiés obtenus lors du premier dépôt. Les images sont calculées par ESQC de manière à pouvoir remonter aux modèles chimiques des adsorbats. Une fois identifiées, ces adsorbats se trouvent être des composés de la molécule utilisée pour la roue, le triptycène : des dimères (apparaissant sur l'image STM en forme de bâton), des trimères (en forme d'hélice) et des tétramères (en forme d'anneau) de triptycène (figure 7). Les roues se sont donc disloquées pour se réassocier de manière imprévue.



Figure 7. Identification des adsorbats. Source : CEMES.

Physiciens et chimistes s'emploient à expliquer le mécanisme de l'obtention des fragments de brouette (figure 8) : la sublimation, c'est-à-dire le passage d'un corps de l'état solide à l'état gazeux, a probablement apporté l'énergie cassant les liaisons triptycène-plateau (en vert sur la figure 8) et certaines liaisons plateau-plateau (les liaisons simples, en bleu) tandis que la surface de cuivre aurait catalysé la formation de multimères de triptycène. La procédure de dépôt a donc déclenché toute une cascade de processus chimiques dans le STM. L'explication a l'avantage de réconcilier le chimiste avec le STM – puisque le STM fait de la chimie à sa manière – et donc avec les indécis physiciens qui avaient disloqué ces molécules si péniblement synthétisées. Elle leur permet aussi aux chimistes et aux physiciens de publier ensemble⁸.

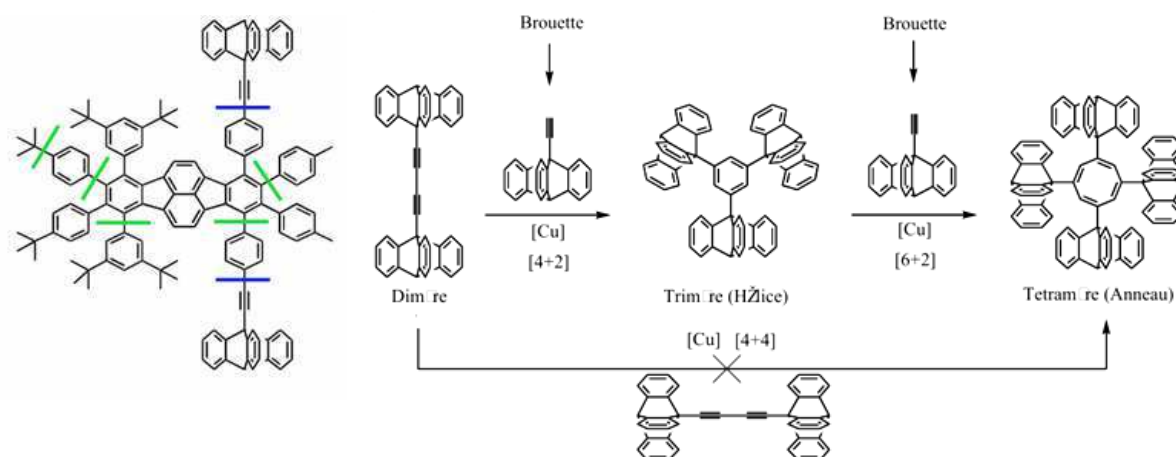


Figure 8. Explication de l'obtention des fragments de brouette. La sublimation apporte l'énergie brisant les liaisons et la surface métallique l'activité catalytique recombinant les fragments triptycène. Source : CEMES.

C'est en manipulant le dimère de triptycène (figure 9) que l'objectif de départ – transformer un mouvement de translation en un mouvement de rotation directionnel – a pu être satisfait.

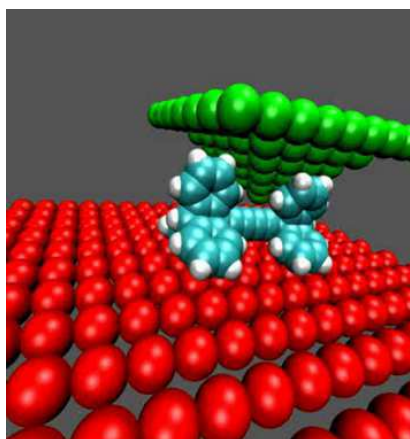


Figure 9. Manipulation du dimère de triptycène. Image de mécanique moléculaire. Source : CEMES.

Comment sait-on si la roue tourne ? Le STM fonctionne en régime stationnaire : il scanne et prélève un relevé à un instant t ; il lui est donc impossible d'imager directement un mouvement en continu avec le STM. En revanche, en simulant le fonctionnement de l'instrument à l'aide d'un algorithme (STM Virtuel) faisant tourner pas à pas les calculs

⁸ Gwénaél RAPENNE, Leo GRILL, Tomasco ZAMBELLI, Sladjana M. STOJKOVIC, Francisco AMPLE, Francesca MORESCO, Christian JOACHIM, « Launching and Landing Single Molecular Wheelbarrows on a Cu(100) Surface », *Chemical Physics Letters*, vol. 431, 2006, p. 219-222.

d'ESQC, les physiciens ont appris à reconnaître dans les signaux de courant tunnel (des relevés électriques en quelque sorte) les signatures caractéristiques d'un mouvement de rotation : des signaux en dents de scie (figure 10). On voit donc que ce qui compte comme résultat pertinent de la recherche concerne aussi bien l'objet que l'instrument : en cherchant à contrôler un mouvement de rotation, il s'agit aussi de montrer que le STM est capable de contrôler ce mouvement au sens de « le caractériser », de permettre de « s'en assurer » ; autrement dit, que le STM est plus qu'un moyen de produire de belles images ; qu'il est plus qu'un manipulateur grossier dotant le physicien de « gros doigts collants » selon l'image dépréciative du chimiste Richard Smalley, mais qu'il permet aussi de déchiffrer les signatures de tel ou tel mouvement moléculaire.

Tant pis pour la brouette : voici donc la roue réinventée à l'échelle moléculaire et une belle publication pour le laboratoire, avec une couverture de *Nature Nanotechnology* à la clé⁹.

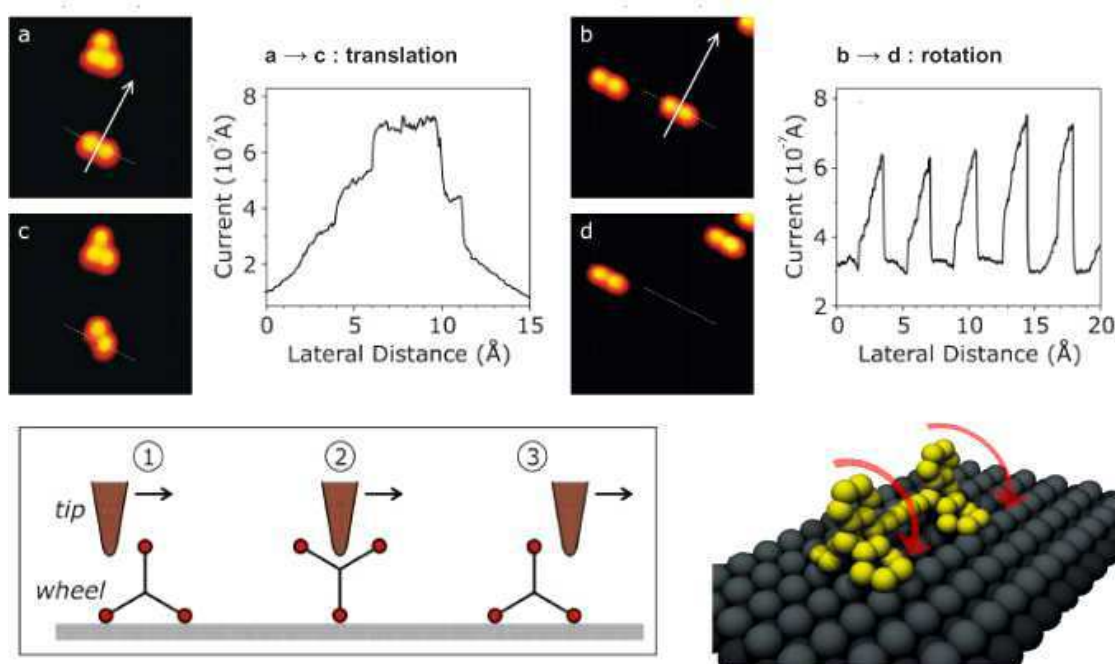


Figure 10. Elle tourne ! L'interprétation des signaux de manipulation permet de différencier un mouvement de rotation d'un simple mouvement de translation sur la surface. Source : CEMES.

Le projet de brouette a donc, en un sens, échoué. D'un autre côté, il s'est révélé riche en surprises ; non pas forcément de bonnes ou de mauvaises surprises, mais des surprises instructives. En effet, loin de frustrer les physiciens, la récalcitrance des brouettes leur ont fourni l'occasion de mettre en évidence certaines caractéristiques du comportement des lois de la physique à l'échelle de la molécule individuelle par rapport au comportement attendu. Calculs ESQC et simulations par STM Virtuel ont permis d'étudier les forces intramoléculaires de la molécule durant son interaction avec la pointe. C. Joachim espère même se servir des nanomachines comme des chevaux de Troie classiques pour aller « chasser le démon quantique » et réécrire quelques lignes des équations de la physique fondamentale¹⁰. Bref, ce qui fonctionne importe moins que

⁹ Leo GRILL, Karl-Heinz RIEDER, Francesca MORESCO, Gwénaél RAPENNE, Sladjana M. STOJKOVIC, Xavier BOUJU, Christian JOACHIM, « Rolling a Single Molecular Wheel at the Atomic Scale », *Nature Nanotechnology*, vol. 2, n°2 p. 95-98.

¹⁰ Christian JOACHIM, « The Driving Power of the Quantum Superposition Principle for Molecule Machines », *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 18, S1935-S1942, 2006.

ce que l'on peut apprendre de ce qui ne marche pas. En revanche, le chimiste semble davantage vouloir que cela fonctionne, peut-être parce qu'après la synthèse, il n'est plus que le spectateur amusé ou agacé de son « bébé » sur la surface¹¹, alors que le physicien, lui, a alors plein de choses à faire : manipuler, calculer le courant, simuler.

Où d'un projet de moteur, on obtint une crémaillère et un aspirateur

Passons à la deuxième partie du programme de « mécanique moléculaire » du GNS : le moteur, désigné pour tirer un travail d'un mouvement de rotation.

Le design (figure 11) : une molécule en étoile à cinq branches bien rigide doit servir de rotor (en bleu sur la figure 11) ; elle est liée par une rotule (un atome de ruthénium autour duquel elle est libre de tourner) à un trépied (le stator, en vert) attaché à une surface, entre deux électrodes d'or ; à l'extrémité de chaque branche de l'étoile se situe un groupement ferrocène électroactif (donneur et accepteur d'électrons) ; chaque groupement électroactif est lié à la partie centrale du rotor par des fragments platine isolants (en noir) empêchant le transfert d'électrons à l'intérieur de la molécule : il est en effet capital que charges se maintiennent au niveau du groupe électroactif donneur ou accepteur, sans quoi le courant ne ferait que traverser la molécule sans entraîner sa rotation. De même qu'un moulin piège et asservit le vent au lieu de se laisser traverser par lui, il faut que la molécule piège et asservisse le courant pour que ce soit elle et non seulement lui qui se déplace.

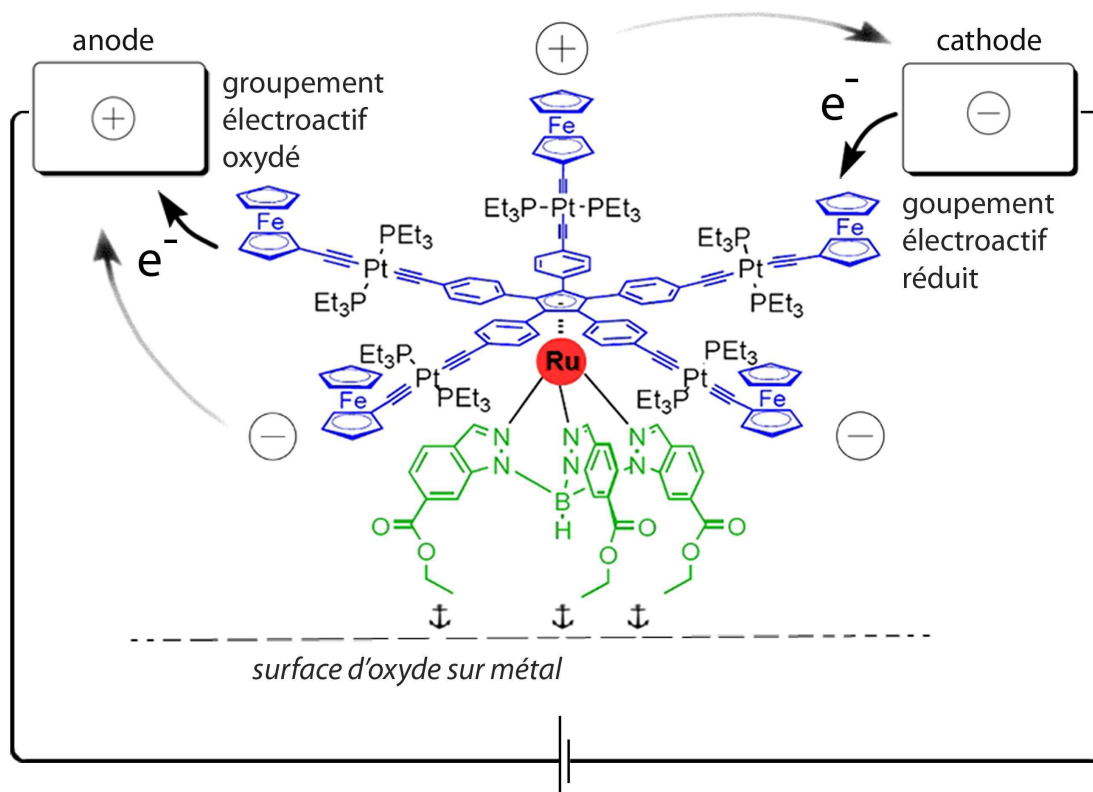


Figure 11. Design et schéma de fonctionnement du moteur moléculaire. Source : CEMES.

Le comportement désiré est le suivant : on induit un courant entre les deux électrodes ; le groupe électroactif le plus proche de l'anode (électrode où entre le courant électrique) est oxydé ; chargé positivement, il est déplacé par répulsion électrostatique vers la

¹¹ André GOURDON, entretien au CEMES, 10 février 2005.

cathode (électrode où sort le courant électrique), chargée négativement ; le rotor effectue un cinquième de tour ; le groupe oxydé parvient à proximité de la cathode ; celle-ci lui cède un électron et rééquilibre ses charges, pendant qu'un autre groupe électroactif se retrouve oxydé à proximité de l'anode ; nouvelle rotation d'un cinquième de tour, etc.

Nous aurions pu, si nous en avions eu la place, raconter les « aventures de synthèse » du moteur moléculaire (comment on voulait s'y prendre ; pourquoi ça n'a pas marché ; ce qu'il a fallu changer ; ce qu'on a compris que trop tard ; un nouveau post-doc ; une bonne surprise ; une autre voie de synthèse qui s'ouvre, etc.). Pire que la brouette, il a fallu six ans et deux tentatives, dont une impasse de synthèse, pour préparer le moteur. Chaque nouvelle machine moléculaire représente un « défi de synthèse¹² », un casse-tête intellectuel et pratique à chaque fois différent. Au stade de la synthèse chimique, la rhétorique de la « maîtrise » de la nature dissimule en fait des stratégies de négociation où il s'agirait plutôt d'être assez fin pour savoir déléguer à la nature des processus improbables au rendement incertain. Il faut aussi savoir « orchestrer » les réactions chimiques, être patient, prendre le temps qu'il faut, et parfois brusquer les choses pour surprendre la nature.

Cette fois-ci, il a été décidé qu'on anticiperait davantage – peut-être parce que les vicissitudes du projet de brouette furent imputées à un défaut d'anticipation, mais peut-être aussi parce que la synthèse du moteur s'étant avérée beaucoup plus longue, il fallait bien en attendant faire bouillir la marmite du labo. Les théoriciens du GNS ont donc pris soin de simuler le comportement du moteur avant de le déposer sur la surface.

La simulation mit en évidence un mouvement non prévu par le design : les cinq groupements phényles situés sur les branches sont gênés par les trois groupements des « pieds » du stator ; or, étant liés au groupe central contenant la rotule ruthénium par des liaisons carbone-carbone simples, ils peuvent très bien pivoter pour libérer le mouvement de rotation du rotor sur l'axe du stator. Il y a donc effet d'engrenage : la première rotation en engrené une seconde au niveau des branches (figure 12)¹³.

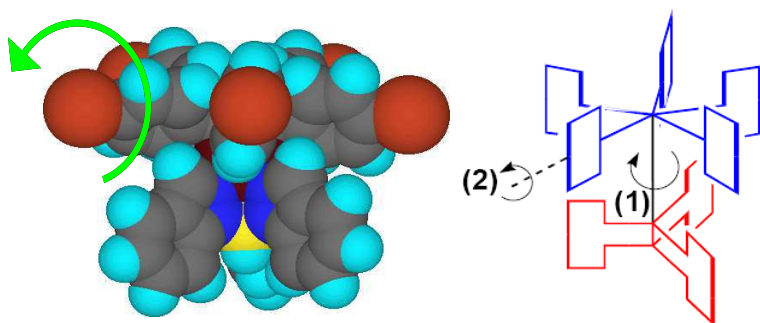


Figure 12. Effet d'engrenage. Modélisation de mécanique moléculaire réalisée à partir d'une simulation. Source : CEMES.

Bingo ! C'est comme cela qu'ils obtiendront peut-être un vrai moteur et non un simple « ventilateur »¹⁴. Car faire tourner quelque chose ne suffit pas : il faut coupler les

¹² Jean-Pierre SAUVAGE, entretien au Laboratoire de chimie organo-minérale, Strasbourg, 17 mai 2006.

¹³ Alexandre CARELLA, Joël JAUD, Gwénaél RAPENNE, Jean-Pierre LAUNAY, « Technomimetic molecules: synthesis of ruthenium(II) 1,2,3,4,5-penta(*p*-bromophenyl)cyclopentadienyl hydrotris (indazolyl)borate, an organometallic molecular turnstile », *Chemical Communications*. n°41, 2003, p. 2434-2435.

¹⁴ Gwénaél RAPENNE, entretien au CEMES, 16/11/2006.

mouvements les uns aux autres pour pouvoir éventuellement récupérer un travail en fin de la chaîne. Par chance, la molécule leur a montré la voie.

La simulation décrit un mouvement d'engrenage, or comment s'en assurer dans une expérience, et ce sans avoir à attendre la fin de la synthèse du moteur complet ?

Les chercheurs imaginent alors une « manip' » (figure 13) mettant en jeu des molécules légèrement différentes celles du rotor : des molécules-étoiles à six branches et non cinq, car elles sont susceptibles de former un cristal plus régulier. Ils en déposent une grande quantité sur une surface ; les molécules-étoiles s'enchâssent les unes dans les autres et forment une monocouche, un large cristal dont l'extrémité présente une forme en dents de scie : la question est alors de savoir s'il est possible d'engrener une molécule unique sur la « crémaillère » que l'agencement cristallin de ses congénères lui offre (la manip', on le voit, évoque aussi des réminiscences de l'épisode de la girouette).

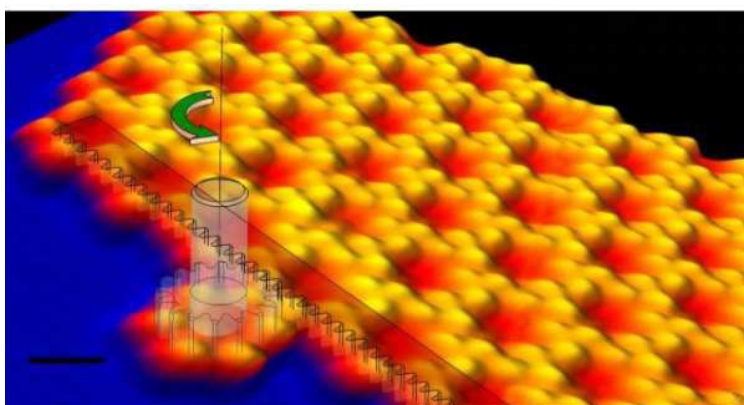


Figure 13. Crémaillère moléculaire. Image STM et surimpression du dispositif désiré. Source : CEMES

Les chercheurs approchent la pointe du STM d'une des molécules situées à l'extrémité du cristal. Ils positionnent la pointe au centre de la molécule et la déplacent le long du rebord denté. Ils espèrent ainsi pouvoir mettre en évidence une rotation de la molécule-étoile autour de l'axe de la pointe, ce qui attesterait l'effet d'engrenage.

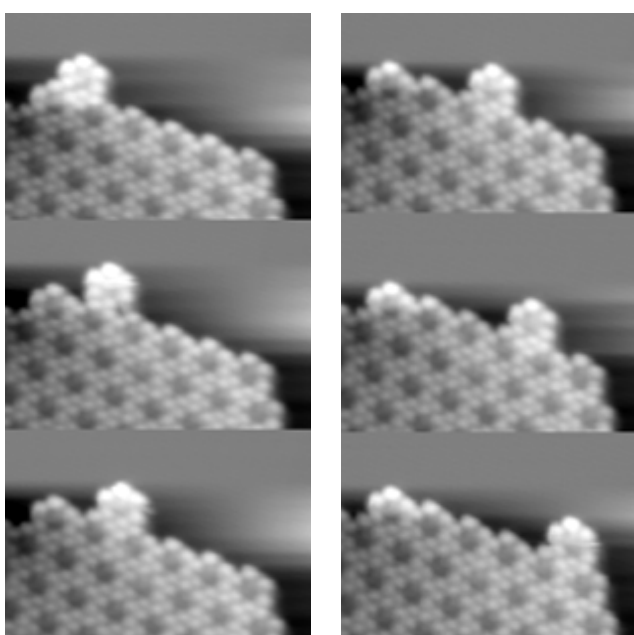


Figure 14. Tourne-t-elle ? Images STM. Source : CEMES.

La manipulation se déroule sans anicroches, mais comment en interpréter les images (figure 14) ? En effet, la molécule étant symétrique, rien ne permet, visuellement parlant, de dire si elle a ou non tourné¹⁵. De plus, comme la situation expérimentale est relativement complexe et qu'un trop grand nombre de paramètres sont confondus, les signaux de manipulation électriques ne présentent aucune forme caractéristique permettant de reconnaître la signature d'une rotation.

Comment faire ? On envisage alors rendre la molécule dissymétrique tout en modifiant le moins possible sa structure géométrique. Les chimistes entreprennent donc de « tagguer » une branche de l'étoile en substituant deux atomes d'azote à deux carbones (figure 15).

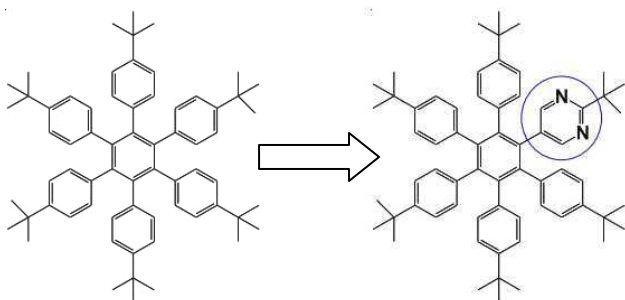


Figure 15. Introduction d'asymétrie dans la molécule. Source : CEMES.

Les images de la deuxième « manip' » semblent alors attester « l'effet crémaillère »¹⁶ (figure 16).

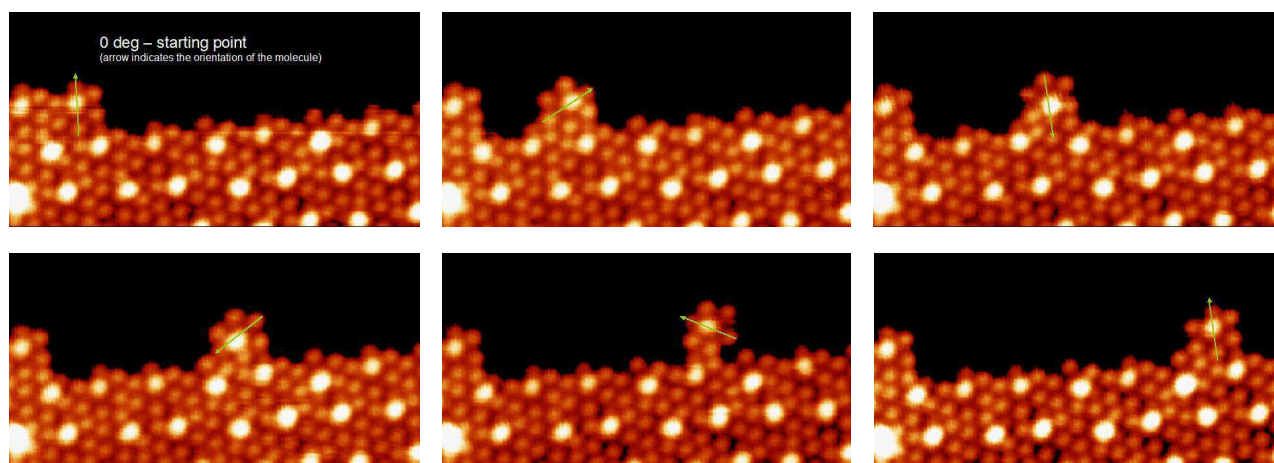


Figure 16. Effet d'engrenage attesté avec la molécule « tagguée ». Source : CEMES.

Mais en baladant la même molécule à six pattes sur la partie métal, le projet a connu une autre bifurcation inattendue : rencontrant des atomes de cuivre traînant sur la surface, la même molécule les piège un par un sous son groupement phényle central, en absorbant jusqu'à six atomes (figure 17). Ceux-ci peuvent ensuite être relargués lorsque

¹⁵ Encore une fois, rappelons qu'il est impossible d'obtenir une « vidéo » du mouvement au STM, mais que le mouvement, dans certaines conditions (assez pures, et ici non réunies), peut être *inféré* de ce que le STM « sent » électroniquement à un instant t_1 et à un instant t_2 .

¹⁶ Franco CHIARAVALLOTTI, Leo GROSS, Karl-Heinz RIEDER, Sladjana M. STOJKOVIC, André GOURDON, Christian JOACHIM, Francesca MORESCO « A rack-and-pinion device at the molecular scale », *Nature Materials*, vol. 6, 2007, p. 30-33.

la molécule est soulevée par la pointe du STM¹⁷. Les chercheurs envoient un communiqué parlant d'une « molécule-aspirateur » au service de presse du CNRS.

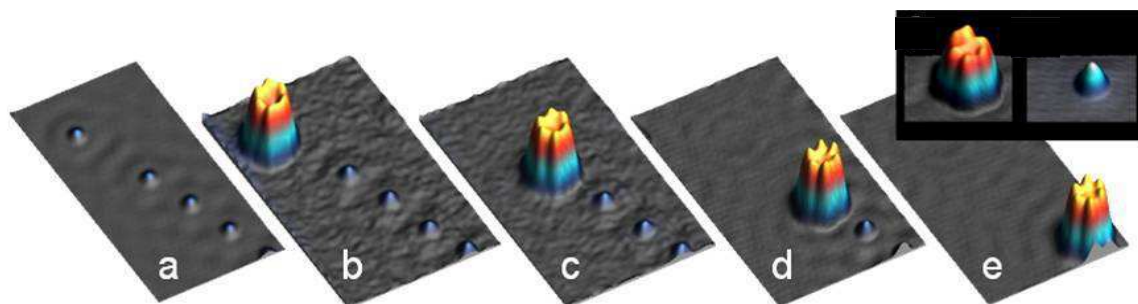


Figure 17. Effet « piège à atomes ». Source : CEMES.

Après six ans de synthèse, la molécule-moteur était prête à fonctionner. Malheureusement, elle n'a pas pu être disposée convenablement entre les électrodes, car celles-ci (des fils d'or ultraminces) ne pouvaient pas être situées à la même hauteur que les groupements électroactifs avec lesquels elles devaient interagir. Le diamètre du fil avait beau être contrôlé à l'atome près : un atome de plus et les électrodes étaient trop hautes ; un atome de moins et elles étaient trop basses ! Morale de l'histoire : aucune nano-ingénierie à la précision atomique ne peut quoi que ce soit si elle considère le milieu de fonctionnement comme un environnement neutre – celui-ci doit être inclus dans le design de la machine.

Considérons maintenant la manière dont ces petits récits obligent à repenser les concepts technologiques de base que le grand récit des nanos utilise comme s'ils allaient de soi : « contrôle », « fonction » et « application ».

Le contrôle n'est pas la maîtrise

Émergeant à l'issue d'un cheminement dans une forêt d'erreurs, de surprises, d'aléas, de ratages et de stratégies qui bifurquent, le contrôle n'a plus grand-chose à voir avec le sens vulgaire de ce qui résulte d'une volonté de domination préméditée.

Prenons le mouvement du dimère de roues : il n'a pas servi de moyen à une fin qui aurait présidée à sa conception, mais il est issu d'un ratage heureux. On peut objecter que c'est là un processus normal d'invention technique ; les chercheurs procèdent par essais et erreurs, se montrent ouverts à l'imprévu mais, au bout du compte, ils « maîtrisent », c'est-à-dire réussissent à agencer des moyens en fonction de fins voulues.

Or cette description est trop simple pour être juste. Prenez les seuls résultats terminaux des « manips » isolés du dispositif qui permet de les obtenir, vous obtenez l'idée du « contrôle » au sens d'une maîtrise unilatérale de la matière par la volonté humaine. C'est bien ce que fait le communiqué de presse du CNRS : il isole la trouvaille de l'« aspirateur à atomes » de l'histoire du moteur, la fait passer pour un dispositif sciemment conçu par des individus géniaux et exagère ses possibilités, laissant croire qu'il sert à construire des structures directement à l'échelle nano en se passant du lourd

¹⁷ Leo GROSS, Karl-Heinz RIEDER, Francesca MORESCO, Sladjana M. STOJKOVIC, André GOURDON, Christian JOACHIM, « Trapping and moving metal atoms with a six-leg molecule », *Nature Materials*, vol. 4, N°12, 2005, p. 892-895.

STM¹⁸. Or sans le STM, on ne peut communiquer avec ces objets. Pour obtenir une précision de 0,1 nanomètres, il faut une énorme machine qui consomme plusieurs litres par jour de gaz cryogénique pour stabiliser la surface sur laquelle fonctionne la nanomachine, car à température ambiante, tout bouge ; il faut tout un laboratoire. Rétablissez maintenant les liens que tissent entre eux les moments du scénario construit peu à peu autour des nanomachines, et le contrôle unilatéral cède la place à une conception plus subtile et plus diversifiée du contrôle. Qu'est-ce à dire ?

Lorsque les chercheurs veulent « contrôler », ils veulent essentiellement trois choses :

- 1) *rendre* directionnel un mouvement moléculaire naturellement aléatoire ;
- 2) avoir un « suivi », une trace lisible du mouvement grâce au STM ;
- 3) enfin, en développant des structures logicielles opérationnalisant des théories (ESQC qui extrait des données quantitatives des images, et STM Virtuel qui inclut le calcul ESQC dans une simulation de l'instrument), ils « contrôlent » au sens où ils « tiennent des tables de registres » (étymologiquement un « contre-rôle » est un registre tenu en double). Ces structures permettent en effet de remobiliser des données pour s'assurer du processus en le rejouant. Mais étrangement, elles ne constituent pas une forme logicielle unique qui s'appliquerait indifféremment à la toute matière moléculaire, car les algorithmes du STM Virtuel doivent être remodelés pour chaque nouvelle espèce moléculaire.

« Ce n'est plus l'échantillon qui s'adapte à une technique de mesure déjà existante mais l'inverse : l'instrument de mesure s'adapte à la taille de l'objet sur lequel une mesure est pratiquée »¹⁹. L'instrument n'est plus une théorie matérialisée (Bachelard), c'est au contraire la théorie qui est un prolongement de l'instrument. Ce faisant, la théorie ne nous fournit pas le point d'Archimède à partir duquel nous irions soulever le monde – ou ici, « programmer » le nanomonde – elle se développe auprès des objets, comme la pointe du STM, pour y injecter localement de l'intelligibilité.

La fonction n'est pas l'utilité

Ce n'est ni l'objet « brouette », ni son utilité qui importe, mais sa fonction : les opérations constitutives de son fonctionnement. On conçoit en général « ce que fait un objet technique », comme son « utilité pour ». Or C₁₄₀H₁₂₀ n'est pas une brouette parce qu'elle servirait à transporter une charge. Même si elle pouvait le faire, on aurait toujours besoin de l'énorme STM pour la pousser. Remarquons de plus qu'il n'y a nullement besoin de greffer des roues à une molécule pour la déplacer !

Qu'est-ce que l'utilité ? Ce n'est pas une propriété d'un objet, mais un certain rapport qui demande qu'un usage dont les finalités ont été formulées soit reconnu par une communauté. Or les chercheurs ne savent pas plus que vous et moi à quoi ces objets vont servir et leur valeur d'usage n'entre nullement en compte lors de leur conception. Leur finalité n'est pas stabilisée. Pourquoi alors parler de « fonction » ? Comme le terme de « contrôle », celui de « fonction » relève d'une pluralité de significations qu'il est aisé d'ignorer pour les réduire au seul rapport fin/moyen.

- 1) Le terme « *fonction* » a d'abord un sens chimique spécifique : il désigne la

¹⁸ « L'aspirateur à atomes », communiqué de presse du CNRS, 5/12/2005. <<http://www.cnrs.fr/>>, accès : 5/12/2006.

¹⁹ Christian JOACHIM et Laurence PLÉVERT, *Nanosciences, la révolution invisible*, Seuil, Paris, 2008, p. 91.

possibilité de liaison qui confère une réactivité à une molécule. « Fonctionnaliser le stator du moteur moléculaire pour qu'il s'accroche sur une surface²⁰ », c'est prévoir les bons réactants en fonction de la composition chimique de la surface. « Fonctionnaliser » c'est ménager une possibilité de liaison, jouer avec la sélectivité des relations entre molécules, leur conférer une disposition. Avec la chimie supramoléculaire notamment, le sens chimique de « fonction » s'est ensuite élargi aux fonctions non chimiques ; par exemple, entre deux anneaux d'une molécule faite de deux fragments entrelacés (caténane), il n'y a pas de lien chimique, mais une « fonction mécanique ». Il y a donc une notion chimique de fonction qui, transposée de proche en proche, prend des significations analogues à la signification chimique d'origine tout en s'étendant à des opérations non strictement chimiques.

- 2) Le terme « fonction » prend ensuite un sens technologique, équivalent à « fonctionnement » ou « schème opératoire » (figure 18). Encore une fois, il ne se réduit pas à l'usage ni au travail. Le philosophe des techniques Gilbert Simondon l'avait bien compris lorsqu'il affirmait que, si du point de vue de leur usage, on peut classer un moteur à élastique et un moteur à explosion dans la même catégorie, celle des moteurs, du point de vue du fonctionnement en revanche, les deux machines ont moins d'affinité entre elles qu'un arc et un moteur à élastique²¹. Les classifications d'usage regroupent les objets entre eux selon des « espèces » illusoires. De plus, elles interprètent la fonction sur la base de l'outil et projettent sur la machine le schéma opératoire de l'homme porteur d'outil au travail sur la matière. C'est le fonctionnement du corps humain au travail qu'elles décrivent, non de celui de la machine. Bref, les fonctions des machines moléculaires ne peuvent être confondues avec leur usage, leur utilité, leur finalité externe ou leur capacité à délivrer un travail. On voit aussi par là qu'on ne peut réduire la « technologie » des molécules-machines à l'agencement de moyens en vue de fins déterminées, mais qu'il s'agit plutôt, dans cette expression, de redonner aux « logos » son sens cognitif : non pas celui d'une théorie pure puis appliquée, mais celui d'une connaissance des opérations mises en jeu dans les tentatives de fonctionnalisation des molécules.

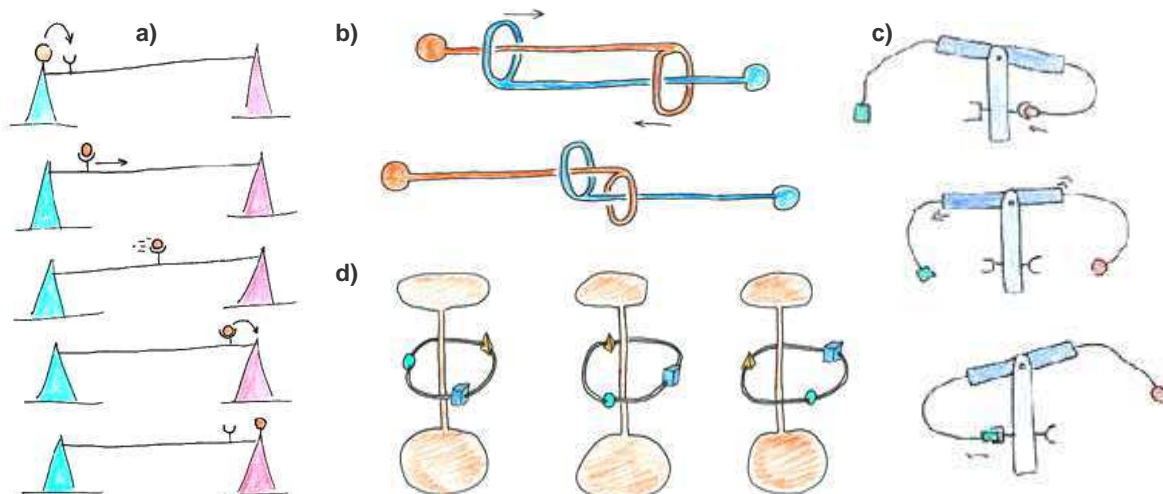


Figure 18. Schèmes opératoires. a) mouvement « téléphérique » ; b) mouvement « glissière » ; c) mouvement « pendule » ; d) mouvement « toupie ».Source : LCOM.

²⁰ Guillaume VIVES, entretien au CEMES, 16/11/2006.

²¹ Gilbert SIMONDON, *Du mode d'existence des objets techniques* [1958], Aubier, Paris, 1989.

- 3) Enfin, « fonction » a un sens relationnel qui fait appel à l'analogie comme opération intellectuelle caractéristique. La brouette avait comme fonction de transformer un mouvement de translation en mouvement de rotation. Ainsi ce que l'on projette dans le petit monde (ici la « brouettité »), ce n'est ni les objets du monde macroscopique, ni leur forme, mais les *opérations* dont ces objets sont le siège. Ce sont les analogies entre opérations qui permettent de reconnaître dans telle ou telle molécule le fonctionnement de telle ou telle machine²². Si la forme ressemble à l'objet macroscopique, tant mieux : cela permet de provoquer des réflexes de reconnaissance et d'amuser la galerie. Mais si l'on s'en tient à cela, la brouette reste une métaphore (un rapport d'identité) et non une analogie (une identité de rapports).

Certes, le comportement du dimère de roue et les effets d'engrenage reproduisent, à l'échelle moléculaire, des comportements d'objets connus à notre échelle, c'est pourquoi les chercheurs les qualifient de « technomimétiques ». Cependant, ce sont, expliquent-ils, des exceptions heureuses. Dès lors, la question n'est ni de projeter les objets techniques connus à la nano-échelle ni de présenter le nanomonde comme « tout autre ». Le fonctionnement de ces nano-objets doit à la fois pouvoir être schématisé à l'aide des intuitions développées à l'échelle macroscopique et tenir compte des spécificités de la physique à cette échelle. Bref, on peut dire que la fonction d'un nano-objet est un *opérateur analogique* faisant communiquer les échelles sensori-motrices.

L'application n'est pas l'industrialisation

G. Rapenne affirme qu'au GNS, ils « visent directement l'application technologique²³ » – affirmation pour le moins surprenante puisque ces nanomachines ne sont pas conçues dans un but d'application industrielle. Comme « contrôle », et « fonction », il faut comprendre cette notion d'« application » dans son contexte d'usage. Ici, « appliquer » est pris dans son sens premier : il signifie « mettre à plat » sur une surface.

« Appliquer » une molécule-machine c'est l'introduire dans un environnement dont elle intègre certaines singularités dans son fonctionnement, faisant par là de cet environnement son « milieu associé »²⁴. Ainsi *les nanomachines ne sont pas des objets isolés*, même quand le physicien dit travailler à l'échelle de « la molécule unique » (« une et toujours la même », dit Joachim). Une « molécule unique » imagée au STM, est un objet moléculaire connecté à au moins deux entités macroscopiques, une pointe et une surface cristalline, ce qui lui permet d'adopter un comportement quasi-classique, individualisé et localisé dans une forme identifiable. Si les molécules peuvent se singulariser par leurs fonctions – s'individualiser aurait dit Simondon – et devenir ainsi des molécules-machines, c'est justement parce qu'elles intègrent un milieu associé comme condition *sine qua non* de leur fonctionnement. Chacune des trois « applications » de la molécule-étoile est l'expression d'une relation de la molécule à un milieu de fonctionnement différent : ce qui rend possible l'application-engrenage, c'est le fait que la molécule à cinq branches soit fixée à une autre molécule libérant et contraignant alternativement sa rotation ; c'est le bord de la surface formée par ses congénères qui permet l'application-

²² Christophe BUCHER, Damien JOUVENOT, Guy ROYAL, entretien au Laboratoire d'électrochimie organique et de photochimie redox (LEOPR), Grenoble, 27 novembre 2006.

²³ Gwénaél RAPENNE, entretien au CEMES, 16 novembre 2006.

²⁴ Gilbert SIMONDON, *Du mode d'existence des objets techniques*, op. cit.

crémaillère de la molécule-étoile à six branches ; dans l'application-aspirateur, c'est le caractère métallique de la surface, mer d'électrons y circulant sans contrainte, qui rend possible le déplacement des atomes sous la même molécule-étoile à six branches.

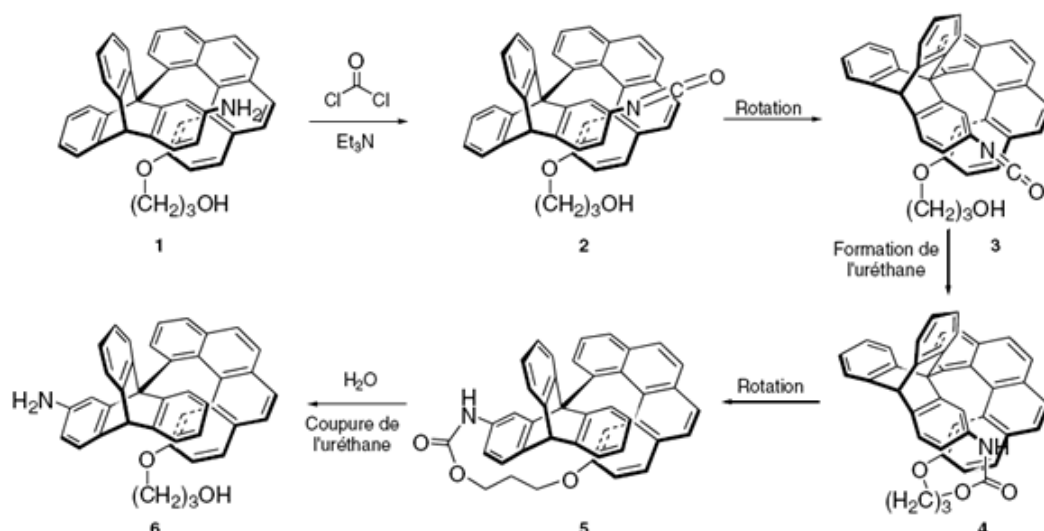


Figure 19. Molécule-machine en solution. Une rotation directionnelle biaisant le mouvement brownien est obtenue grâce à un stratagème chimique en six étapes. Source : T. Ross KELLY, Harshani DE SILVA, Richard A. SILVA, « Unidirectional Rotary Motion in a Molecular System », *Nature*, vol. 401, p. 150-152.

Si les chimistes des molécules-machines valorisent le dépôt sur surface en termes d'« application », c'est parce qu'ils ont coutume de penser le fonctionnement de ces objets en solution à partir d'une population moyenne de molécules. S'ils préparent, par exemple, une molécule-roue tournant de manière directionnelle dans une solution contenant des milliards de ces molécules (figure 19), ils ne peuvent jamais rapporter l'accomplissement du mouvement à l'échelle d'une molécule individuelle. Bien sûr, les chimistes mesurent. Mais sans le STM, ils n'ont de données que sur des moyennes, des moles de molécules. Ils pensent, dessinent, schématisent le mouvement, mais rien ne permet de dire si l'isomère final de la molécule de départ est la même molécule ayant accomplie sa rotation. Deleuze et Guattari auraient dit qu'ils enchaînent des *calques* selon une relation chimiste/molécule qui est toujours *molai*re. « *Il faut toujours reporter le calque sur la carte* »²⁵. La relation chimiste/molécule devient moléculaire lorsque la molécule est *appliquée* sur le plan d'une surface. Elle porte alors sur les potentialités d'un objet individuel dans toutes ses parties. C'est en ce sens que le STM permet « l'application » des molécules-machines.

Post-scriptum

On comprend maintenant pourquoi ces « petits récits techniques » sont si peu entendus. D'abord, parce qu'ils font bégayer les « grands mots ». Ensuite, parce qu'ils insistent sur les relations que tissent les projets et les objets. Or avec les nanoparticules produites en masse pour absorber les odeurs dans nos chaussettes, liquider les bactéries de nos frigidaires et rendre les crèmes solaires invisibles, ou avec les nanotransistors embarqués dans nos ordinateurs, tout est fait pour que les humains n'aient aucun rapport de « vivre avec » les cohortes de nano-non-humains qui concourent à

²⁵ Gilles DELEUZE et Félix GUATTARI, *Mille plateaux, Capitalisme et schizophrénie 2*, Minuit, Paris, 1980, p. 21.

fonctionner leurs objets d'usage. Ils peuvent bien travailler pour nous, du moment qu'on ne les voit pas. D'où la logorrhée des grands discours : ceux-ci ne font que combler par un symbolisme facile le vide créé par le retrait des objets de fonctionnement hors de l'échelle humaine de perception et d'action. Pourquoi se soucier des objets ? La technoscience ne vise-t-elle pas à rabattre sur *l'efficience* toute tentative de *faire sens*, de sorte qu'aller décrire ses objets, c'est « tomber dans le panneau » et se condamner à manquer ce qui « nous » arrive aujourd'hui ? Toute autre est la leçon que nous avons tirée de nos enquêtes sur les nanomachines : la logique du fonctionnement ne vient plus étouffer celle du sens. Elle la déplace sur d'autres agencements collectifs d'énonciation que ceux des discours de maîtrise ou de perte de contrôle et fait peut-être signe vers une redéfinition de la techno-logie : un *logos* qui ne serait pas la rationalité instrumentale de la science toujours-déjà-appliquée à des fins d'efficacité (L'École de Francfort), ni la métaphysique destinale dévoilant tout ce qui est comme fonds « disponible pour » (Heidegger) mais une pratique narrative agissant au cœur des choses.